
1 Einleitung

Die Menschheit steht im Bereich der Nutzung von Energieträgern, bei der Energiebereitstellung und der Energiewandlung vor gewaltigen Herausforderungen. Fossile Brennstoffe, die heute zu den gebräuchlichsten Energieträgern zählen, müssen langfristig durch alternative Lösungen ersetzt werden, da die Vorräte an fossilen Energieträgern aufgrund ihrer Endlichkeit in absehbarer Zeit verbraucht sein werden. In unmittelbarer Zukunft erfordert ein weltweit wachsender Energiebedarf und die damit verbundenen, zunehmend steigenden Belastungen der Umwelt durch die negativen Auswirkungen von Schadstoff- und Treibhausgasemissionen ein Umdenken und Handeln. Aus diesem Grund bildet die Forderung nach Umweltverträglichkeit schon heute neben der Wirtschaftlichkeit und der Versorgungssicherheit eine der drei gleichberechtigten Säulen der Energiebereitstellung. Der Minderung von Treibhausgasemissionen, vor allem des Treibhausgases Kohlenstoffdioxid (CO_2), wird in diesem Zusammenhang verstärkt Beachtung geschenkt [1].

Die Abtrennung von CO_2 und die anschließende geologische Speicherung oder stoffliche Nutzung stellt eine Möglichkeit dar, anthropogene CO_2 -Emissionen, die bei der Verbrennung von fossilen Brennstoffen entstehen, zu reduzieren. In Kohle- oder Gaskraftwerken, aber auch in industriellen Großanlagen, wie z.B. Stahl- oder Zementwerken und Raffinerien, wird CO_2 abgeschieden, per Pipeline oder Schiff zu einer (Langzeit-) Speicherstätte transportiert, dort über eine Bohrung in eine geeignete geologische Formation eingebracht und somit langfristig aus der Atmosphäre isoliert [2]. Alle Prozessschritte der sogenannten Carbon Capture and Storage (CCS) und Carbon Capture and Reuse (CCR) Technologien sind derzeit Gegenstand intensiver Forschung. Dabei wird die effiziente Abtrennung von CO_2 unter möglichst geringem Energieaufwand, die Identifikation geeigneter Transportmöglichkeiten und die sichere geologische Speicherung bzw. effektive industrielle Verwertung von CO_2 angestrebt.

Carbonate Looping ist ein effizientes, kalksteinbasiertes Post-Combustion-Verfahren zur CO_2 -Abscheidung, das für die Nachrüstung an bestehende Kraftwerke oder Industrieanlagen geeignet ist [3, 4]. In einem System aus gekoppelten Wirbelschichten wird zunächst das CO_2 des Kraftwerksabgases abgeschieden, bevor es in hochkonzentrierter Form wieder freigesetzt und der Weiterverwertung oder geologischen Speicherung zugeführt werden kann. Die CO_2 -Einbindung läuft im sogenannten Carbonator über die Reaktion von CO_2 mit gebranntem Kalk (CaO) zu Calciumcarbonat (CaCO_3) ab. Die CO_2 -Freisetzung erfolgt im sogenannten Calciner durch eine Temperaturerhöhung, die durch Verbrennung von Kohle mit reinem Sau-

erstoff erreicht wird. An verschiedenen Stellen des Carbonate Looping Prozesses kann bei hohen Temperaturen Wärme zur Dampf- und zur Stromerzeugung genutzt werden und führt somit zu einer Steigerung der elektrischen Leistung [5, 6]. Aufgrund seiner Energieeffizienz verursacht der Carbonate Looping Prozess einen im Vergleich zu anderen Post-Combustion-Technologien geringeren Wirkungsgradverlust. Dieser wird auf 5 – 7 %-Punkte abgeschätzt, wenn die nachgeschaltete Verdichtung des CO₂, die für den Transport und Speicherung bzw. Weiterverwertung des CO₂ erforderlich ist, berücksichtigt wird [6, 7]. Vor diesem Hintergrund und aufgrund der Tatsache, dass als kostengünstiges Sorbens weltweit verfügbarer Kalkstein eingesetzt werden kann, werden für das Carbonate Looping Verfahren verhältnismäßig niedrige CO₂-Vermeidungskosten von unter 20 € pro Tonne vermiedenem CO₂ abgeschätzt [8].

Die Carbonate Looping Technologie befindet sich derzeit im Entwicklungsstadium auf dem Weg zur Marktreife. In zahlreichen grundlegenden Untersuchungen unter Laborbedingungen und in Versuchsanlagen wurde das Potential der Technologie bestätigt. Erfolgreich durchgeführte Carbonate Looping Versuche mit kontinuierlicher CO₂-Abscheidung im semiindustriellen Maßstab in einer 1 MW_{th}-Versuchsanlage am Institut für Energiesysteme und Energietechnik der Technischen Universität Darmstadt können als Legitimation und als Übergang zu einer großtechnischen, industriellen Weiterentwicklung der Technologie gewertet werden.

Im Rahmen dieser Arbeit werden die weiteren Entwicklungsstufen von Carbonate Looping als Verfahren zur CO₂-Abtrennung aus Kraftwerksabgasen analysiert. Möglichkeiten, Potentiale sowie ein sinnvolles Vorgehen werden vorgeschlagen, untersucht und bewertet. Ausgehend von der Auslegung und Planung einer Carbonate Looping Pilotanlage mit einer thermischen Leistung von etwa 20 MW_{th} wird die energetische Optimierung der Pilotanlage sowie die Applikation von Carbonate Looping für zwei exemplarische, steinkohlegefeuerte Großkraftwerke und eine Abfallverbrennungsanlage betrachtet.

2 Hintergrund und Motivation

Der Anstieg der Weltbevölkerung, das globale wirtschaftliche Wachstum und die Entwicklung des Lebensstandards beeinflussen den weltweiten Energiebedarf maßgeblich. Experten prognostizieren, dass sich der Primärenergiebedarf in den nächsten 100 Jahren beinahe vervierfachen wird. Besonders die Annäherung des Pro-Kopf-Energiebedarfs der Entwicklungs- und Schwellenländer an den der Industrieländer führt zu diesem rasanten Anstieg [9]. Der steigende weltweite Energiebedarf wird in großen Teilen durch erhöhten Ressourcenverbrauch gedeckt werden, der unweigerlich zu einer wachsenden Umweltbelastung führt [10]. Um den negativen Einfluss der Energiebereitstellung auf Umwelt und Klima zu minimieren, sind sinnvolle Maßnahmen und nachhaltige, verantwortungsvolle Lösungen zur Deckung des Energiebedarfs erforderlich.

Nachfolgend werden die prognostizierte Entwicklung des globalen Energiebedarfs und die damit verbundene Entwicklung der Treibhausgasemissionen sowie der gegenwärtige Stand der deutschen Stromerzeugung präsentiert. Neben der Darstellung des Anstiegs des CO₂-Gehalts in der Atmosphäre und dessen Einfluss auf das weltweite Klima werden Möglichkeiten aufgezeigt, wie ein weiterer CO₂-Anstieg in der Atmosphäre verhindert bzw. abgeschwächt werden kann.

Die Notwendigkeit, Maßnahmen zu finden und weiterzuentwickeln, die zu einer Minderung energiebedingter CO₂-Emissionen führen und dadurch einem weiteren globalen Temperaturanstieg entgegen wirken, ist Anstoß und Motivation für diese Arbeit gewesen.

2.1 Energiebedarf und CO₂-Emissionen

Bereits im Jahre 2035 werden auf der Welt voraussichtlich 8,5 Mrd. Menschen leben. Das entspricht einem Zuwachs von ca. 2 Mrd. Menschen in gerade einmal 25 Jahren [10]. Die Zunahme der Weltbevölkerung, einhergehend mit aufstrebenden Volkswirtschaften und dem damit verbundenen stärkeren wirtschaftlichen Einfluss breiter Bevölkerungsteile, wird nach übereinstimmenden Prognosen unterschiedlichster Institutionen und Unternehmen zu einem starken Anstieg des weltweiten Energiebedarfs führen [10-12].

In den „New Lens“-Szenarien stellt Shell aus heutiger Sicht wahrscheinliche Entwicklungen auf sozio-politischer und ökonomischer Ebene dar und analysiert deren Einflüsse auf die

Energieversorgung. Das gesellschaftlich angestrebte Wirtschaftswachstum an sich wird als positiv gewertet, jedoch ist damit ein steigender Bedarf an Ressourcen verbunden. Dies ist ein Hauptmerkmal des Wohlstands-Paradoxons [11]. Abbildung 2-1 zeigt den prognostizierten globalen Primärenergiebedarf bis 2060 nach dem „Oceans“-Szenario [11].

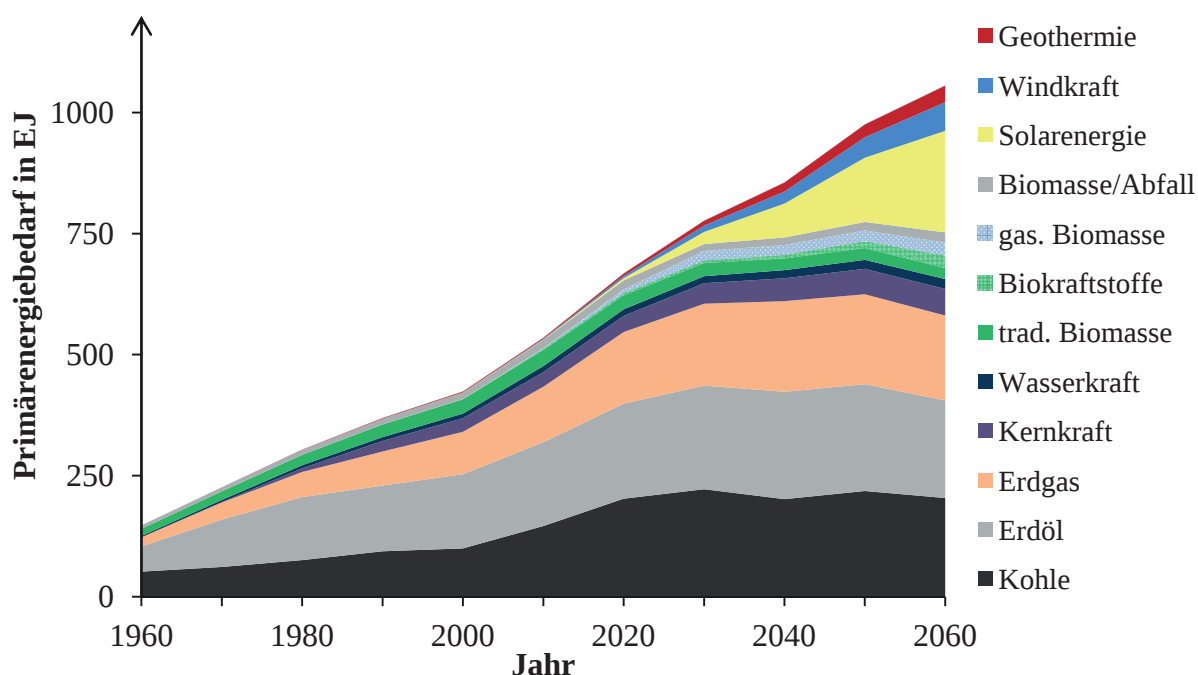


Abbildung 2-1: Weltweiter Energiebedarf seit 1960 und prognostizierter Energiebedarf bis 2060 [11]

Der Primärenergiebedarf, der sich von 1960 bis heute beinahe vervierfacht hat, wird sich bis ins Jahr 2060 aller Voraussicht nach noch einmal verdoppeln. Zwar basiert die Energieversorgung auf einem breiten Energiemix, maßgebliche Stütze der Energiebereitstellung bleiben jedoch zunächst die fossilen Energieträger Kohle, Erdöl und Erdgas. Der Bedarf an fossilen Energieträgern steigt bis 2030 sehr stark an. Prognostisch können erst ab dem Jahr 2050 erneuerbare Energien in großem Umfang eingesetzt werden und zunehmend die fossilen Energieträger ablösen und ersetzen.

Während flüssige und gasförmige fossile Brennstoffe (Erdöl und Erdgas) überwiegend zur Gewährleistung der Mobilität und zur Wärmebereitstellung eingesetzt werden, wird Kohle vor allem zur Stromerzeugung genutzt [13]. Kohle bietet den Vorteil, dass sie in großen Mengen in zahlreichen Regionen der Welt verfügbar ist. Sie trägt somit derzeit wesentlich zur Versorgungssicherheit bei und reduziert die Abhängigkeit von Erdöl und Erdgas. Bis 2030 wird mit

einem Mehrbedarf an Kohle von mehr als 35 % gegenüber der heutigen jährlichen Verbrauchsmenge gerechnet. Die Energiebereitstellung durch Kohle ab dem Jahr 2020 beträgt voraussichtlich mehr als 200 EJ pro Jahr (Abbildung 2-1).

Fossile Energieträger werden während des Energiewandlungsprozesses verbrannt. Die thermische Verwertung führt zwangsläufig zur Entstehung des Treibhausgases CO₂. 1960 wurden weltweit ca. 10 Gt an CO₂ emittiert. Ca. 20 % der CO₂-Emissionen wurden durch die Stromerzeugung verursacht. In 2010 wurden ca. 31 Gt an CO₂ emittiert, davon gehen ca. 12 Gt an CO₂ (das entspricht in etwa einem Anteil von 38 %) auf die Stromproduktion zurück. Prognosen gehen davon aus, dass die weltweiten CO₂-Emissionen im Jahre 2030 auf 43 Gt steigen werden, wovon über 41 % durch die Stromproduktion aus fossilen Energieträgern verursacht werden [11].

In Deutschland wurden im Jahr 2010 764 Mt an CO₂ emittiert. Abbildung 2-2 verdeutlicht, dass der Großteil des emittierten CO₂ auf die Energiewirtschaft zurückzuführen ist [1].

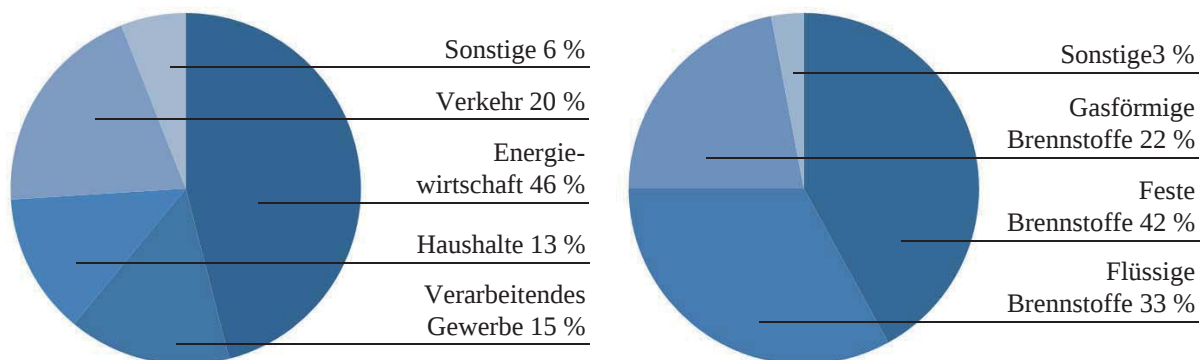


Abbildung 2-2: Energiebedingte CO₂-Emissionen nach Sektoren und Energieträgern 2010 in Deutschland (764 Mio. t CO₂) [1]

Auf die Kraftwerke entfielen rund 46 % der Emissionen. Nach dem Verursacherprinzip werden die Emissionen allerdings dem Sektor zugeordnet, in dem der Sekundärenergieträger letztendlich verbraucht wurde. Aus Abbildung 2-2 (rechte Seite) kann entnommen werden, dass die festen Brennstoffe (vor allem Stein- und Braunkohle) mit 42 % im Jahr 2010 zu den Hauptverursachern von CO₂-Emissionen gezählt haben. Sie haben allerdings nur zu 23 % zur Primärenergiebereitstellung beigetragen [1].

Im Jahr 2012 wurden in Deutschland rund 617 Mrd. kWh Strom erzeugt (Abbildung 2-3). Auch wenn der Anteil der sogenannten „erneuerbaren Energien“^a an der Stromerzeugung in Deutschland seit 1990 sehr stark gewachsen ist und im Jahr 2012 fast 22 % des deutschen Strombedarfs gedeckt hat, so wurde dennoch im selben Jahr der Großteil des in Deutschland produzierten Stroms mit fossilen Energieträgern erzeugt [1, 14].

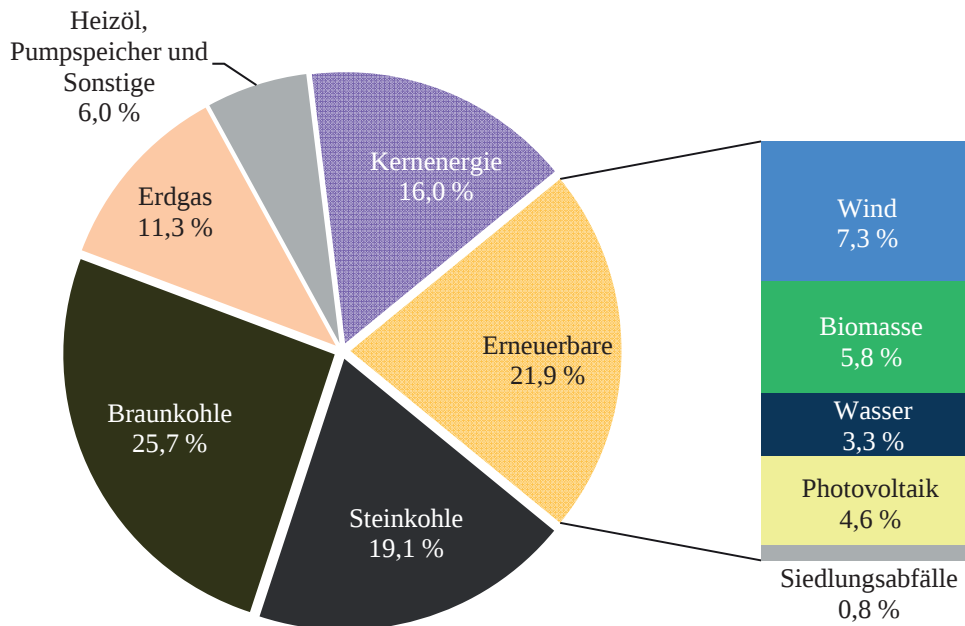


Abbildung 2-3: Bruttostromerzeugung 2012 in Deutschland (617 Mrd. kWh) [14]

Alleine die Energieträger Stein- und Braunkohle wurden mit einem Anteil von knapp 45 % maßgeblich zur Stromerzeugung in Deutschland eingesetzt.

In ihrem Energiekonzept von 2010 hat die deutsche Bundesregierung das Ziel ausgegeben, die Emissionen von Treibhausgasen deutlich zu reduzieren. Ferner wird für das Jahr 2050 eine Emissionsreduktion von mindestens 80 % gegenüber den Emissionen des Jahres 1990 als Zielmarke vorgegeben [1, 15]. Die Ziele sollen vor allem durch den verstärkten Ausbau der erneuerbaren Energien erreicht werden. Vor dem Hintergrund des beschlossenen Ausstiegs aus der Kernenergie bis zum Jahr 2020 wird in den nächsten Jahren vermehrt auf

^a Energie kann lediglich von einer Form in andere Formen umgewandelt, nicht aber „erneuert“ werden. Da sich der Begriff der „erneuerbaren Energien“ allerdings im deutschen Sprachgebrauch etabliert hat, wird er im Folgenden verwendet.

Kohle bei der Stromerzeugung zurückgegriffen werden müssen, um die Versorgungssicherheit zu gewährleisten.

2.2 Anthropogener Treibhauseffekt und globale Erderwärmung

Im vorangegangenen Kapitel wurde die Entwicklung des weltweiten Primärenergiebedarfs und der globalen CO₂-Emissionen in den letzten 50 Jahren gezeigt. Die aktuelle Zusammensetzung des deutschen Strommix sowie dessen Zusammensetzung in naher Zukunft und Prognosen zur Entwicklung des globalen Energiebedarfs verdeutlichen, dass fossile Energieträger, vor allem Kohle, auch weiterhin einen dominierenden Anteil an der Stromerzeugung tragen werden. Der damit unweigerlich verbundene verstärkte Ausstoß von CO₂ beeinflusst das Klima global.

1896 entdeckte und erklärte der schwedische Physiker Svante Arrhenius den natürlichen Treibhauseffekt. Der entsprechende Anteil und die natürliche Zusammensetzung der Treibhausgase Wasserdampf (H₂O), Kohlenstoffdioxid (CO₂), Ozon (O₃), Lachgas (N₂O) und Methan (CH₄) in der Atmosphäre führen dazu, dass die mittlere Temperatur der Erdatmosphäre 15 °C beträgt. Kurzwellige Solarstrahlung passiert die Treibhausgase, während ein Teil der von der Erde abgestrahlten und reflektierten Infrarotstrahlung (IR-Strahlung) von den Treibhausgasen absorbiert wird und so zum Treibhauseffekt und zu einer Temperaturerhöhung führt.

Analysen von Eiskernbohrungen aus der Antarktis zeigen, dass die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre mit etwa 280 ppm in den letzten 10.000 Jahren annähernd konstant gewesen ist [16]. Die stabile CO₂-Konzentration in der Atmosphäre wird als Ursache für das ungewöhnlich stabile Weltklima, welches die Voraussetzung für die Entwicklung der Menschheit und ihrer Hochkulturen gewesen ist, angesehen [16].

Erst mit Beginn der Industrialisierung während der zweiten Hälfte des 18. Jahrhunderts stieg die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre langsam an. Durch die zunehmende Verbrennung von fossilen Brennstoffen in den letzten 50 Jahren und die daraus resultierenden, freigesetzten klimarelevanten CO₂-Emissionen setzt sich dieser Effekt verstärkt fort. Die erhöhte Konzentration von Treibhausgasen in der Atmosphäre führt zu einer Verstärkung des Treibhauseffekts und wird als anthropogener, also vom Menschen verursachter, Treibhauseffekt bezeichnet.

Kontinuierliche Messungen des CO₂-Anteils in der Atmosphäre am Mouna Loa auf Hawaii auf 3.400 m über Meereshöhe bestätigen diesen Anstieg [17]. Die in Abbildung 2-4 dargestellte Keeling-Kurve zeigt eine Zunahme der atmosphärischen CO₂-Konzentration innerhalb der letzten 50 Jahre von etwa 310 ppm auf knapp unter 400 ppm. Saisonbedingt kommt es zu charakteristischen Schwankungen, die Konzentration in der Luft nimmt im Frühjahr ab und im Herbst zu. In der Tendenz ist allerdings eine stetige jährliche Zunahme deutlich zu erkennen. Anfang Mai 2013 wurde erstmalig eine Konzentration von mehr als 400 ppm gemessen [17].

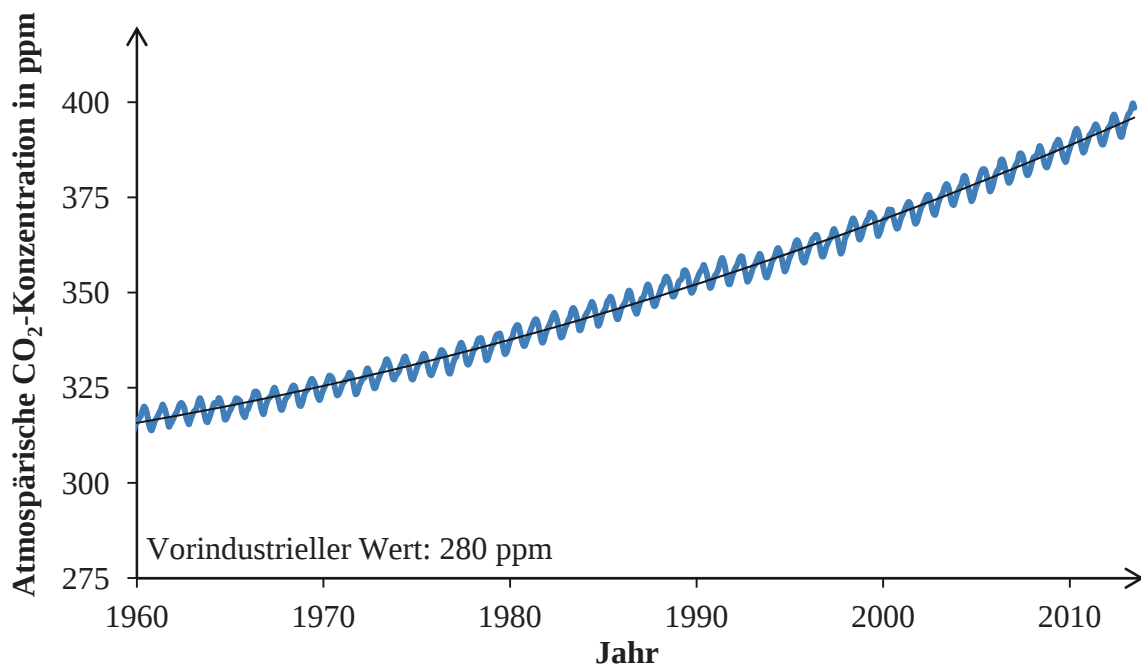


Abbildung 2-4: Anstieg der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre seit 1960 (gemessen am Mouna Loa, Hawaii) [17]

Zwar werden Treibhausgasemissionen lokal freigesetzt, die Auswirkungen sind jedoch globaler Natur. Durch die erhöhte atmosphärische CO₂-Konzentration steigt die globale Temperatur der Erdatmosphäre langsam an. Schon ein kleiner Temperaturanstieg von einem oder wenigen Kelvin kann weitreichende Auswirkungen auf das globale Klima haben [18]. Klimazonen verschieben sich, Wetter-Extrema nehmen zu, Meeresströmungen können sich verändern und der Meeresspiegel wird ansteigen. Dies kann z.B. zu massiven Ernteverlusten führen und die Ernährung der Weltbevölkerung gefährden [16].

Der Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) hat in Modellberechnungen die Auswirkungen der verstärkten Freisetzung von Treibhausgasen auf das weltweite Klima und die globale Erwärmung untersucht [12, 19]. In unterschiedlichen Szenarien wird der Anstieg der atmosphärischen CO₂-Konzentration auf 540 – 970 ppm abgeschätzt, was einen Temperaturanstieg an der Erdoberfläche von 2,5 – 4,1 K und einen Anstieg des Meeresspiegels von bis zu einem halben Meter zur Folge hätte. Aufgrund langwieriger Prozesse und Wechselwirkungen würde selbst das Einfrieren der CO₂-Emissionen auf heutigem Niveau zu einem Anstieg der globalen Erdtemperatur und einem Anstieg des Meeresspiegels führen [19].

Der Einfluss und die negativen Auswirkungen des Treibhausgases CO₂ auf das Klima verdeutlichen, dass schnellstmöglich Maßnahmen unternommen werden müssen, um die CO₂-Emissionen drastisch zu mindern und somit der globalen Erwärmung entgegenzuwirken. Auch wenn sich diese nicht mehr komplett aufhalten lässt, so sind dennoch intensive Anstrengungen erforderlich, um die anthropogene Umweltbeeinträchtigung so gering wie möglich zu halten.

Im folgenden Kapitel werden mögliche Strategien zur Verringerung des Ausstoßes klimarelevanter Emissionen vorgestellt. Ihre erfolgreiche Umsetzung wird notwendig sein, um die bisher nur in Teilbereichen absehbaren Folgen des Klimawandels abzuschwächen.

2.3 Strategien zur Verringerung des Ausstoßes klimarelevanter Emissionen

Es gibt fünf prinzipielle Strategien, die das Potential zur effizienten Reduzierung des Ausstoßes klimarelevanter Emissionen haben und somit zu einer nachhaltigeren Energieversorgung beitragen können:

- Einsparung/Verbrauchsreduktion,
- Effizienzsteigerung,
- Nutzung erneuerbarer Energien,
- Nutzung von Kernenergie,
- Anwendung von CCS-Technologien.

Die Strategie „Einsparung/Verbrauchsreduktion“ sieht vor, dass aufgrund eines rationelleren Umgangs mit Energie der Primärenergiebedarf sinkt und somit weniger klimarelevante Emissionen freigesetzt werden.

Mit „Effizienzsteigerung“ erreicht man ein besseres Ausnutzen des Energiegehalts der eingesetzten Energieträger. Im Energiewandlungsprozess wird bei gleichem Einsatz an Primärenergie eine größere Ausbeute an Endenergie erzielt, so dass im Umkehrschluss bei konstantem Bedarf der Primärenergieeinsatz sinkt. Sowohl die spezifischen als auch die absoluten Emissionen sinken.

Durch die Nutzung von regenerativen Energieträgern wird eine nahezu CO₂-neutrale Stromerzeugung erreicht. Werden fossile Energieträger durch erneuerbare Energien ersetzt, können CO₂-Emissionen fast vollständig vermieden werden.

Prinzipiell ist auch die Nutzung von Kernenergie dazu geeignet, CO₂-Emissionen bei der Stromerzeugung zu vermeiden. Schwierigkeiten ergeben sich jedoch im Umgang mit den radioaktiven Rückständen und der ungeklärten Frage der Endlagerung.

CO₂, das als das Hauptprodukt bei der Verbrennung von fossilen Brennstoffen in großen Mengen entsteht, wird bei der Anwendung der CCS-Technologien so separiert, dass es in konzentrierter Form weiterverarbeitet oder geologisch gespeichert werden kann. Durch die Abtrennung des CO₂ wird die Freisetzung in die Atmosphäre verhindert und somit ein Anstieg der atmosphärischen CO₂-Konzentration trotz der Verwendung von fossilen Energieträgern minimiert [20].

Unter Ausnutzung der beschriebenen CO₂-Minderungspotentiale, abgesehen von der Nutzung von Kernenergie, plant auch die deutsche Bundesregierung, die gesamten deutschen Treibhausgasemissionen bis ins Jahr 2050 um 80 % gegenüber dem Stand des Jahres 1990 zu reduzieren [15].

Neben der Verbesserung CO₂-belasteter Prozesse (Effizienzsteigerung) und der Reduktion des Stromverbrauchs um 25 % gegenüber 2008 (Einsparung) soll der Anteil der erneuerbaren Energien an der Stromerzeugung auf 80 % gesteigert werden. Des Weiteren wird die Menge an importiertem Strom, vor allem aus erneuerbaren Energiequellen, stark ansteigen. Aus Abbildung 2-5 wird allerdings auch ersichtlich, dass bis zum Jahr 2050 die fossilen Energieträger (vor allem Stein- und Braunkohle) für die Stromerzeugung immer noch eine wichtige Rolle spielen. Mit der Nutzung fossiler Energieträger ist jedoch die Freisetzung von CO₂ unweiger-